

FW円筒殻の製作および実験モード解析を用いた 固有振動数の測定－専攻科特別研究を通して－

A Study of Measurement of Natural Frequencies and Modes of
FW Formed Cylindrical Shells by Modal Testing.: Through the Research of
Development in the Advanced Course of College of Technology

成澤 哲也* 星 悠介**

Tetsuya NARISAWA* Yusuke HOSHI**

Light weight structures made of fiber reinforced plastics (FRP) are manufactured by several forming processes. In this study, circular cylindrical shells are formed by the FW forming unit which has been designed by this Mechanical Dynamics Lab.. The natural frequencies and modes measured by the modal testing are compared to the analytical results based on the anisotropical lamination theory. The result shows the simply supported condition setted in this experimental test is convenient for measuring vibration characteristics as the natural frequency and mode. Above result was investigated with Yusuke HOSHI in the advanced course of KUSHIRO National College of Technology for aim of creative education and technology development.

Key Word: FW Forming, FRP, Cylindrical Shells, Modal Testing, Advanced Course of College of Technology

1. はじめに

繊維強化プラスチック (FRP) は高い比剛性と比強度を示し、かつ設計要求に見合った構造剛性を付与できるテラリング材料である。また、フィラメントワインディング (FW) 法は、回転するマンドレルにFRPロービングを糸巻きの原理で巻く方法である。本年秋に就航したボーイング787の製造にも使用され注目された。

本報では平成20～22年度にかけて機械力学研究室の卒業研究、専攻科特別研究生であった星悠介君の研究について紹介する。内容は成形装置の設計製作、マンドレルの改良、固有振動数と固有モードの測定および解析値との比較、そしてFW成形工程の見直しと固有振動数を高める方法の提案となっている。本期間、実験的に難しい単純支持条件の実現や実験モード解析装置を使った測定に当たり学生は大いに苦労した。その点も含め報告する。

2. FW円筒殻の成形

2. 1 成形装置

FW成形機にはマンドレルに対し測地線に沿ってロービングを $+\alpha$ 、 $-\alpha$ 方向に折り返しながら巻く機能を備える必要がある。そこで、卒業研究テーマにこの成形機の設計製作を取り上げた。

製作した成形機をFig. 1に示す。構成はマンドレ

ルを取付けるチャック部、それを回転させる回転機構部および筐体である。マンドレル両端円周方向にはロービング引っ掛けピンが配されている。このピン本数とピッチ間隔については本科生の研究成果に拠るところが大きい。また、FRP材にはグラファイ

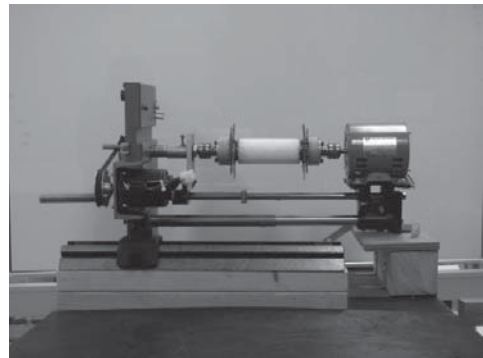


Fig. 1 設計製作したFW成形機

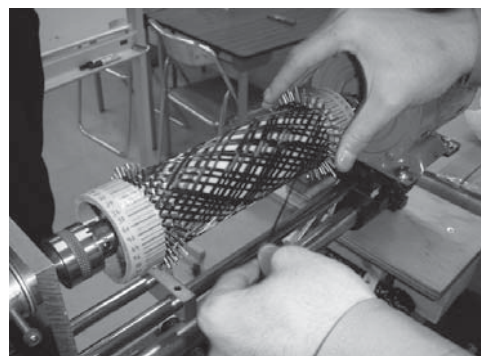


Fig. 2 張力を掛け測地線に沿って成形

*釧路高専機械工学科

**平成22年度専攻科修了(よつ葉乳業株式会社)

ト/エポキシプリプレグ (Tow Prepreg UT500-12-RC38-SX3, 新日本石油) を用いた。成形はFig. 2のように約10Nの張力を掛けながら行う。この張力の効果は興味深い研究テーマの一つでもある。成形工程は型組み, ワインディング, 加熱硬化, 離型の順となる。熱硬化にあたっては定風恒温炉 (ヤマトDK912) を使用して, 100℃, 1hのひずみ取りに続き, 150℃, 2hで硬化後徐冷する。卒業研究期間, 設計法の習得と工作技術の定着がなされ教育効果が大きいと感ずる¹⁾。

2. 2 テストピース

Fig. 3にテストピース外観を示す。積層形態は $[\pm \alpha / \pm \alpha / \dots (\text{内側} / \dots / \text{外側})]$ で表記する。内径のバラツキに有意差はなかったが, 外径は層数が1層増すごとに約3mm大きくなり, 配向角も目標値に対し3~5°大きくずれる。これは, マンドレル材であるポリアセタール樹脂の線膨張係数が金属比で約10倍であることから, 硬化時の熱膨張が原因と推定した。そこで, Fig. 4に示すように成形後の繊維断面アスペクト比を計測したところ, 1より大きい値となったことから, マンドレルが膨らみ, 結果的に周方向配向した繊維が軸方向に逃げ, 配向角が大きくなったものと解釈した。よって, この知見につ

いて発表した²⁾。

3. 振動実験

3. 1 実験装置

Fig. 5に実験モード解析システムを示す。加速度ピックアップ (小野測器 NP-3211) をテストピース表面に貼り, インパルスハンマ (DYTRAN5800SL) にて打撃加振した。取得した加速度データをFFTアナライザ (小野測器 DS2000) で伝達関数に変換し, MeScopeVES (システムプラス) にて固有振動数と固有モードを求めた。測定方法は一点加振多点計測法を用い, データを平均化処理した³⁾。

さて, 支持方法によってテストピースの固有振度数, 固有モードは大きく変わる。本研究では実現の難しいとされる両端単純支持を採用し, そのサポートホルダーの設計を行うこととした。試行錯誤を繰り返し, 群馬大学機械システム工学科永井健一教授のご教示もあり, Fig. 6に示す幅4mmの電工用ビニールテープ (ヤマト N0200) を48等配したホルダーを作り上げた。その結果, Fig. 7のようにシェル振動が観測できたので, そのことを発表した^{4,5)}。この製作のために, 昼夜を問わず支持部品を換えては実験した。学生の気力に感謝する次第である。

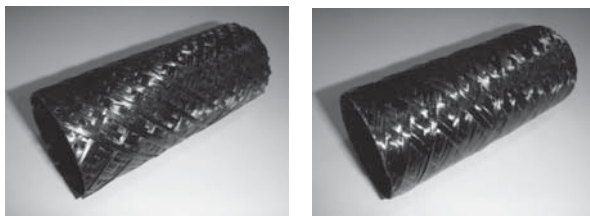


Fig. 3 でき上がったテストピース

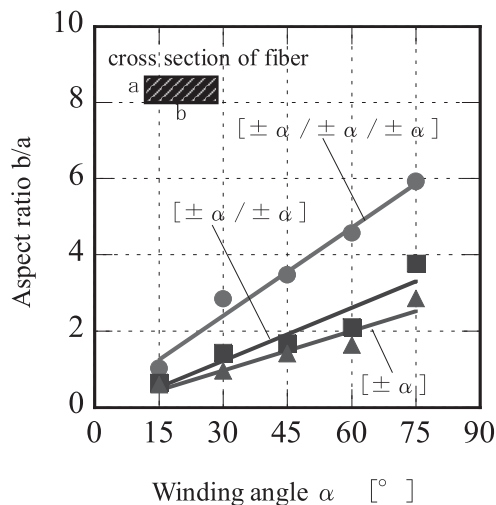


Fig. 4 繊維ロービングのアスペクト比



Fig. 5 実験モード解析システム

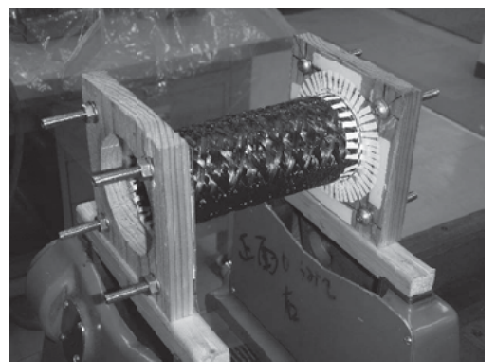


Fig. 6 実現した単純支持サポートホルダー

3. 2 固有振動数と固有モード

Fig. 8 に 1～4 次振動の固有振動数を示す。ドットが実験値，ラインが解析値である。また，(m, n) はモードナンバーである。1～4 次と次数が上がるとともに振動数が高くなること。3 層積層は 2 層積層より振動数は高くなり殻厚に比例すること。振動数が最

大値をとる配向角は低次振動で $60 \sim 75^\circ$ ，高次振動で 45° 近傍との知見が得られた。解析結果もこれを裏付けていた。よって，高次振動では周方向波数の次数が上がり，周方向に繊維が配されるほど振動数が高くなるとの結論を得たので発表した⁶⁾。

また，全体的に配向角が小さい場合に実験値の振動数が低くなっている。特に， $\alpha = 15^\circ$ の場合に顕著である。この原因を調べるため，Fig. 9 に示すようにテストピース外表面の観察を行った。その結果，2 層積層 (a) では外表面にすき間が存在し網目構造となっていること，3 層積層 (b) では繊維引張られ凸凹が存在することが分かった。このことから，配向角の小さい場合には網目構造に起因する剛性低下が起

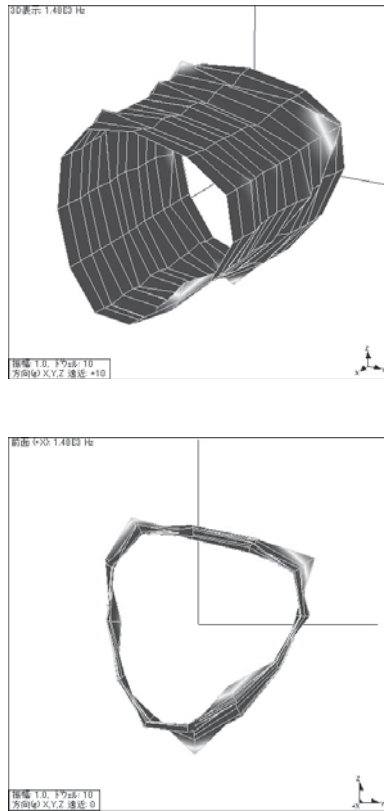


Fig. 7 単純支持によるシェル振動モードの確認
(1st, m, n=1, 3)

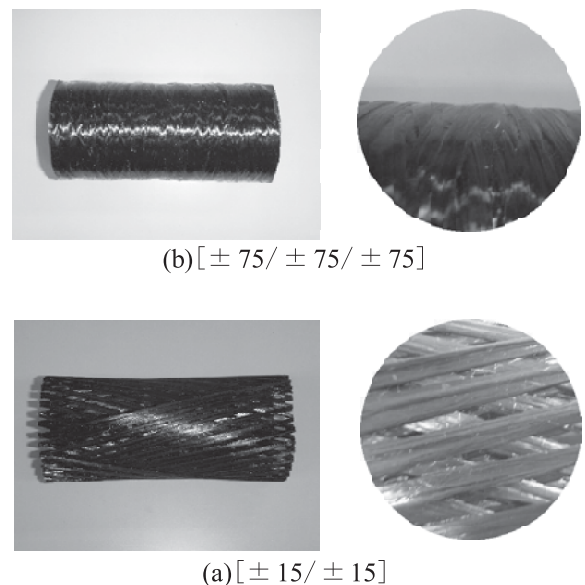


Fig. 9 テストピースの外表面

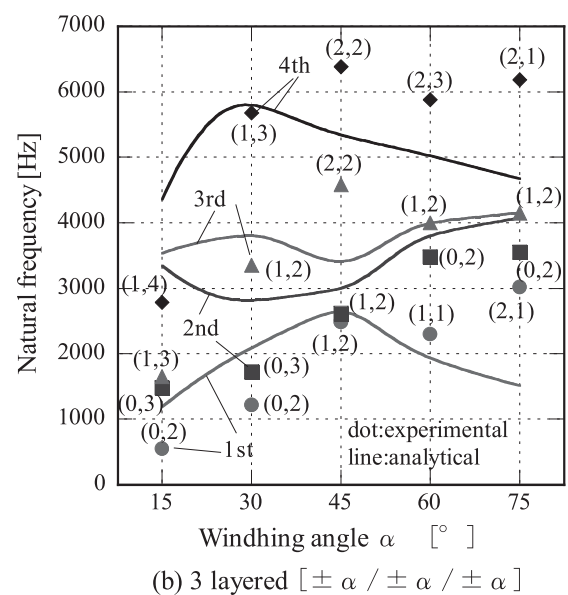
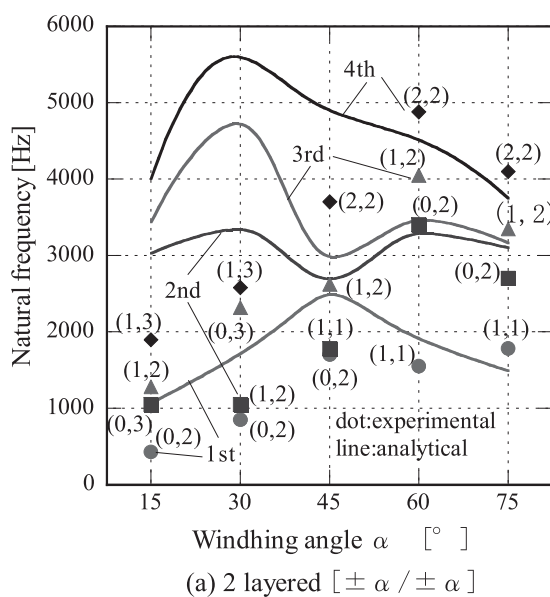


Fig. 8 実験値と解析値との比較 (ドット: 実験値, ライン: 解析値)

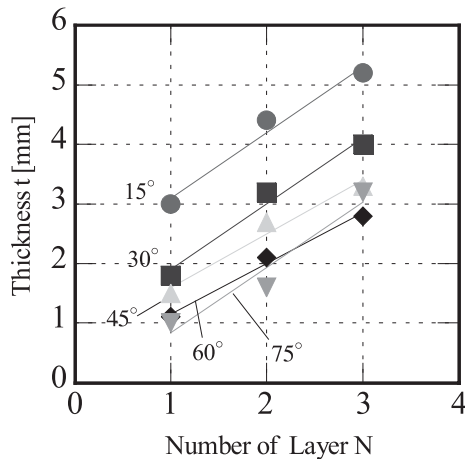


Fig. 10 積層数に対する殻厚の変化

こり、配向角の大きい場合にはフープ巻き（繊維が円周方向に配されること）となるため繊維に張力が加わり凸凹を生じたと結論付けた。また、Fig. 10に示すように、配向角の小さい場合に繊維同士の交差点数が増え殻厚が増加すること、殻厚は配向角、積層数と相関があることが認められた⁷⁾。

最後に、実験値を異方性理論による解析値と比較しその誤差について検討した。Fig. 11のRatioは(実験値－解析値) / 解析値である。2層積層(a)では $\alpha = 60^\circ$ 以上で解析値に近くなるが、 $\alpha = 15^\circ$ では固有振動数が低くなっている。また、3層積層(b)では解析値との誤差が減少する。ただし、2, 3層積層どちらについても $\alpha = 75^\circ$ の実験値は解析値より大きい値となる。これより、繊維がフープ巻きに近くなり、剛性が増大したことによる結果と一致することが確認された^{8,9)}。

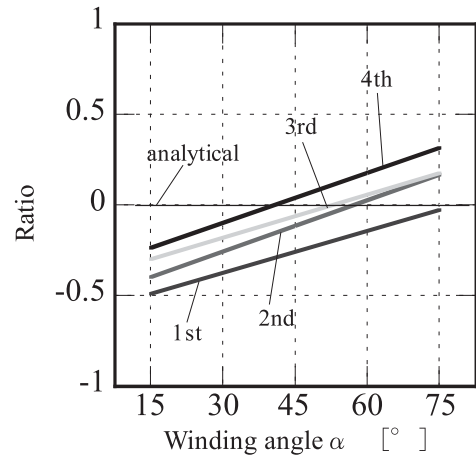
一連の成果について整理し、FW円筒殻の振動特性を求める場合にはシェル構造として取り扱うべきとの結論を導きだし特別研究論文としてまとめた¹⁰⁾。

4 雑感

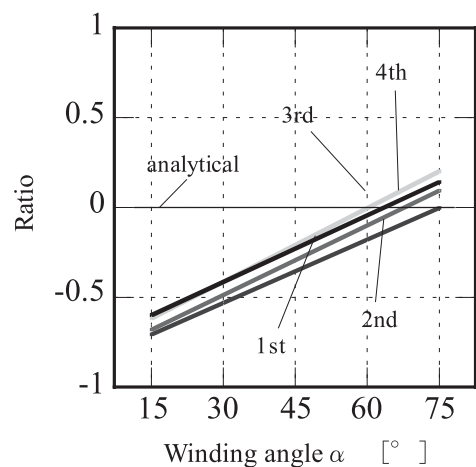
機械力学研究室で学んだ専攻科学生は星君で2人目である。専攻科学生を受け入れることで参考文献のように研究成果が充実する。平成9年度修了生の岩田君は日本機械学会北海道支部講演会でベストアワード賞、星君は専攻科学生特別研究発表会で最優秀賞を受賞した¹¹⁾。また、本科生への研究指導も自然に行われ活性化する。専攻科生への研究支援が学校運営の面からも新しい活路が見えてくる。

参考文献

(1) 星, FW円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定, 平成20年度釧路高専機械工学科卒業論文, (2009. 1).



(b) 3 layered $[\pm \alpha / \pm \alpha / \pm \alpha]$



(a) 2 layered $[\pm \alpha / \pm \alpha]$

Fig. 11 解析値との誤差

(2) 星・成澤, FRPグリッド構造の機械剛性評価に関する研究, 日本機械学会北海道学生会第37回学生員卒業研究発表会, 北見, (2009. 3), 61-62.

(3) 星・成澤, FW円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定, 日本機械学会D&D講演会, 札幌, (2009. 8), アブストラクト集, 102.

(4) 樋上・成澤・星, 斜向配向されたFW円筒殻の振動特性, 日本機械学会D&D講演会, 札幌, (2009. 8), アブストラクト集, 100.

(5) 星・成澤・樋上, FW円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定(支持条件の影響), 日本機械学会北海道支部第48回講演会, 札幌, (2009. 11), 5-6.

(6) 樋上・成澤・星, FW材の等価剛性を考慮したFRPの弾性定数測定, 日本機械学会北海道支部第48回講演会, 札幌, (2009. 11), 7-8.

(7) 樋上・成澤・星, FW円筒殻成形装置の製作と評価, 釧路工業高等専門学校紀要, (2009. 12), 43, 13-18.

(8) 星・成澤, FW円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定—支持条件の改良—, 日本機械学会D&D講演会, 京都, (2010. 9), アブストラクト集, 37.

(9) 星・成澤, FW円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定, 平成22年度道内国立高専専攻科研究発表会, 函館, (2010. 11), 21-22.

(10) 星, FW円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定, 釧路工業高等専門学校特別研究論文, (2011. 2).

(11) 星, FW円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定, 釧路工業高等専門学校専攻科学生特別研究発表会, 釧路, (2011. 2), 17-18.